

不同植物对污水净化效果研究

肖广敏¹, 张成军², 李 鹏², 赵同科²

(1. 河北农业大学 资源与环境学院, 河北 保定 071000; 2. 北京市农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘 要:以菖蒲、鸢尾、芦苇、香蒲等 4 种植物为试材, 比较了 4 种植物在不同时期对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和全磷(total phosphorus, TP)的净化效果, 分析了植物不同部位试验前后生物量及氮磷含量的变化, 探讨了影响植物净化效率的因素。结果表明: 植物在快速生长期时的净化效率高于稳定时期的净化效率。4 种植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的最大去除率表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇, 去除率分别为 98.3%、98.2%、97.7%、96.8%, 对污水中 TP 的最大去除率表现为香蒲>菖蒲>鸢尾>芦苇, 去除率分别为 96.7%、96.4%、95.9%、95.2%。植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除率与植物地下部的生物量有关, 地下部生物量大植物吸收的氮磷多, 植物的去除率高。

关键词:湿地植物; 人工湿地; 净化效率; 生物量

中图分类号:X 171 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)16-0063-04

人工湿地污水处理技术是一种新兴的污水处理技术。与其它污水处理技术相比, 人工湿地污水处理技术具有运营成本低、维护简单、不易造成二次污染等优点^[1-2]。人工湿地净化污染物的机理极为复杂, 其中植物起着重要的作用^[3]。在人工湿地中, 植物可以直接吸收利用污水中的氮磷等营养物质, 同时植物的根系可以为根际微生物提供生长繁殖所需要的氧气^[4]。微生物的大量繁殖可以进一步提高对污染物的去除效率^[5]。目前对于人工湿地植物的研究主要集中在对植物种类的筛选^[6-8], 而对于同种植物不同时期的净化效率及植物各部分净化效果的研究较少。因此研究植物不同生长时期对污水的净化效率及植物各部分对污染物质的积累, 对更好地管理人工湿地系统提高污水处理效果具有重要意义。

现选取菖蒲、香蒲、芦苇、鸢尾等北京地区常见的湿地植物作为研究对象, 通过测定植株不同生长时期对污水中全磷(total phosphorus, TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的去除效果和收割后植株各部分生物量和氮磷含量的变化, 评价植株不同生长时期对污水中氮磷等物质的去除效果和植株各部分对污染物质的去除贡献, 以期为在北京

地区构建人工湿地污水处理系统, 提高人工湿地对污染物的去除效率提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物菖蒲(*Acorus calamus* Linn)、鸢尾(*Iris tectorum*)、芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)均采自北京延庆地区湿地中。采集植株幼苗后洗净泥土, 去除枯叶, 带回实验室用清水培养备用。

1.2 试验方法

1.2.1 人工湿地构建 于无孔陶瓷花盆(上部直径 30 cm, 底部直径 28 cm, 盆高 50 cm)底部铺设直径 2 cm 鹅卵石作为滤水层, 铺设厚度约为 5 cm, 其上填充水洗砂作为人工湿地基质, 厚度约为 30 cm, 在滤水层中插入直径 1 cm 玻璃管, 玻璃管顶端伸出盆外用于采集污水。

1.2.2 试验设计 选择大小基本一致、生物量接近的上述备用湿地植物每样 2 份, 1 份用于测定植株各部分的生物量和氮磷含量; 另 1 份用于试验栽种于基质中, 另外设置对照组(不栽种任何植物只填充基质), 试验共设计 5 个处理, 3 次重复。植物栽上后, 加自来水至砂子基质饱和, 并保持其上 2~3 cm 薄水层, 稳定 15 d, 其间换水 3 次。稳定期结束后采用模拟污水进行浇灌, 模拟污水使用硫酸铵和磷酸二氢钾配制, 其中氮以 NH_4^+ 形式存在, 磷以 PO_4^{3-} 形式存在。模拟污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、全磷(TP)浓度见表 1, 每次浇灌量 10 L, 试验设计水利停留时间为 5 d。每日采集水样并测定水样中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 浓度, 并根据公式计算植物对氮磷营养物质的去除率。

第一作者简介:肖广敏(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染。E-mail: xgm8945491@163.com.

责任作者:赵同科(1959-), 男, 研究员, 现主要从事农业面源污染防治工作。E-mail: tkzhao@126.com.

基金项目:科技部“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAD15B01); 北京市农林科学院国际合作基金资助项目(GJHZ2014)。

收稿日期:2015-03-15

试验结束后分地上部和地下部收集植物样。将采集的植物样洗净,在 105℃烘箱中杀青 2 h 后,80℃烘箱中烘干至恒量,得到植物样干重,然后取烘干的植物样分地上部和地下部测定植物不同部位的全氮和全磷含量。 $R(\%) = (C_1 - C_0) \times 100 / C_1$ 。式中, $R(\%)$ 为百分去除率, C_1 (mg/L)为进水浓度, C_0 (mg/L)为出水浓度。

表 1 试验进水水质

Table 1	Index of water quality	mg/L
	铵氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	总磷 TP
进水浓度	16.63~17.20	15.37~18.70

1.3 项目测定

水样铵态氮测定采用纳氏试剂比色法;水样总磷测定采用过硫酸钾消解,钼锑抗比色法;植物全氮测定采用硫酸消解,凯氏定氮法;植株全磷测定采用硫酸-双氧水消解,钼锑抗比色法。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行处理,多重比较采用 Duncan 新复极差试验法。

2 结果与分析

2.1 人工湿地植物对氨氮的去除效果

从图 1A 可以看出,植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率与污水的停留时间不成正比。污水进入人工湿地污水处理系统 1 d 后,各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除已经有明显效果,对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率范围在 90.9%~95.7%。随着污水停留时间的增加,各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率也缓慢增加,当污水停留 4 d 后,各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率达到最大,最大去除率表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇>空白,去除率分别为 98.3%、98.2%、97.7%、96.8%、94.5%。其中香蒲与鸢尾去除率差异不显著,其余均达差异显著水平。停留时间到达第 5 天后,各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率不再增长并略有减小。

由图 1B 可知,与快速生长期相比,植物稳定时期对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率下降,平均去除率约下降 6.0%。但是去除率的变化趋势没有改变,污水在人工湿地处理系统中停留 1 d 后,各处理对污水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除均有明显效果,对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率范围在 85.0%~89.3%。随着停留时间的增加,各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率缓慢增加,并在停留第 4 天时去除率达到最大,最大去除率表现为香蒲>菖蒲>鸢尾>芦苇>空白,去除率分别为 93.3%、91.8%、91.5%、89.6%、89.3%。其中香蒲去除率显著大于其它处理,菖蒲和鸢尾去除率差异不显著,芦苇和空白去除率差异不显著。停留时间到达第 5 天后各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率不再增长并开始降低。

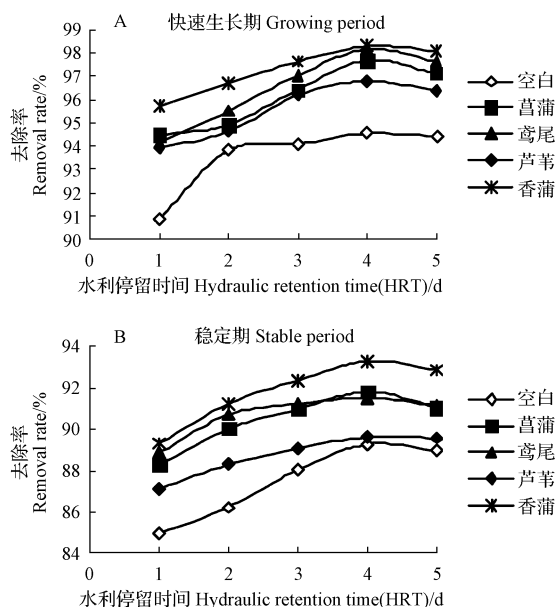
图 1 植物不同时期各处理对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率

Fig. 1 The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rate of plants in different periods

2.2 人工湿地植物对磷的去除效果

从图 2A 可以看出,植物对污水中全磷(TP)的去除率与污水停留时间不成正比,污水在人工湿地污水处理系统中停留 1 d 后,各处理对污水中 TP 的净化就有明显效果,各处理对污水 TP 的去除率范围在 85.4%~94.7%。随着污水停留时间增加,各处理对污水中 TP 的去除率也增加,在停留第 4 天对污水中 TP 达到最大去除率,最大去除率表现为香蒲>菖蒲>鸢尾>芦苇>

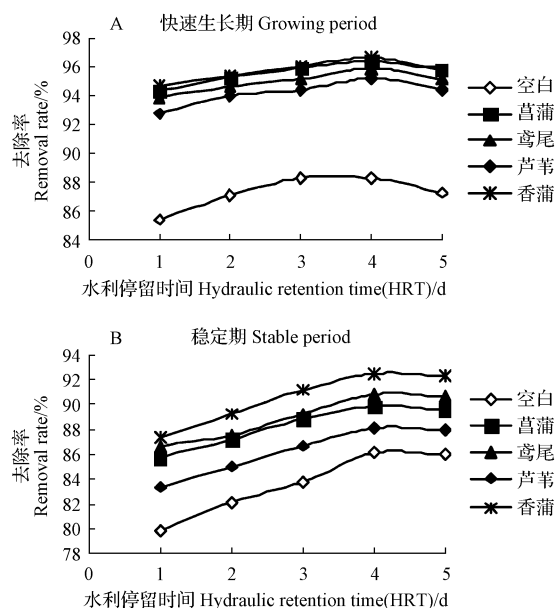


图 2 植物不同时期对全磷的去除率

Fig. 2 The TP removal rate of plants in different periods

空白,最大去除率分别为 96.7%、96.4%、95.9%、95.2%、88.3%。其中香蒲与鸢尾对于污水中 TP 的去除率差异不显著,其它均差异显著。停留时间到达第 5 天后各植物对污水中 TP 的去除率不再增长并略有减小。

由图 2B 可知,与快速生长时期相比,稳定时期植物对污水中 TP 的去除率降低,平均去除率下降 6.0%,但是各处理去除率的变化趋势没有改变。污水在人工湿地污水处理系统中停留 1 d 后,对污水中 TP 的去除效果明显,各处理对污水中 TP 的去除率范围在 79.8%~87.3%。随着污水停留时间增加,植物对污水中 TP 的去除率也增加。在污水停留第 4 天各处理去除率达到最大,最大去除率表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇>空白,最大去除率分别为 92.5%、90.8%、89.8%、88.1%、86.1%均差异显著。停留时间到达第 5 天后各植物对污水中 TP 的去除率不再增长并略有减小。

2.3 植物各部分生物量及氮磷含量

从表 2 可以看出,试验结束后,各植物的总生物量表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇。生物量分别为

表 2 不同植物生物量及氮磷含量变化

Table 2 Changes of biomass and nitrogen and phosphorus content of different plants

指标 Item	菖蒲 Calamus		鸢尾 Iris tectorum		芦苇 Reed cattail		香蒲 Cattail	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
	Abovepart	Underpart	Abovepart	Underpart	Abovepart	Underpart	Abovepart	Underpart
试验前干重 Dry weight/g	0.75	3.22	2.02	3.05	0.98	1.20	1.52	4.70
试验后干重 Dry weight/g	2.31	9.92	5.84	8.20	3.96	4.83	6.78	20.96
试验前氮含量 Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)	6.37	4.89	6.25	4.98	5.43	3.88	7.42	5.49
试验后氮含量 Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)	7.54	5.66	7.40	5.77	6.25	4.60	8.71	6.47
试验前磷含量 Phosphorus content/(mg·g ⁻¹)	1.33	1.25	1.21	1.18	1.02	0.75	1.34	1.23
试验后磷含量 Phosphorus content/(mg·g ⁻¹)	1.74	1.61	1.66	1.62	1.48	1.18	1.90	1.74

3 讨论与结论

人工湿地污水处理系统对污水中 NH₄⁺-N 的去除依靠微生物的硝化、反硝化作用以及植物和基质的吸收作用和氨氮的挥发作用^[9]。人工湿地污水处理系统对污水中 TP 的去除是植物吸收、微生物的积累及基质的物理化学作用等 3 个方面协同作用的结果^[10]。该试验在基质相同的情况下,各处理对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的去除率不同,其中栽种香蒲的处理对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的去除率最高,平均 NH₄⁺-N 去除率为 94.6%,平均 TP 去除率达到 93.1%,空白对照处理对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的去除效率最低,平均 NH₄⁺-N 去除率为 90.5%,平均 TP 去除率为 85.4%。栽种植物的处理与不栽种植物的空白对照处理相比,去除率相差不大,可能是因为试验采用的是盆栽模拟试验,植物的生长受到限制,总生物量较小。在生长的不同时期,植物对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的净化效率不同,在植物快速生长期,对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的去除率要大于植物稳定

27.74、14.04、12.23、8.79 g。与试验前相比,所有植物的总生物量均有增加,其中地下部的生物量增长高于地上部的生物量增长。总生物量增加表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇,分别增重 21.52、8.97、8.26、6.61 g。地上部生物量增长表现为香蒲>鸢尾>芦苇>菖蒲,分别增加 5.26、3.82、2.98、1.56 g。地下部生物量增长表现为香蒲>菖蒲>鸢尾>芦苇,分别增加 16.26、6.70、5.15、3.63 g。植物地上部的氮磷含量要高于地下部氮磷含量,而且试验后植物地上部的氮磷含量增加也高于植物地下部的氮磷含量增加。与试验前相比,植物地上部地下部的氮磷含量均有增加。其中地上部的氮磷含量增加量大于地下部的氮磷含量增加量。地上部氮含量增加表现为香蒲>菖蒲>鸢尾>芦苇,分别为 1.29、1.17、1.15、0.82 mg/g,磷含量表现为香蒲>芦苇>鸢尾>菖蒲,分别为 0.56、0.46、0.45、0.41 mg/g。地下部氮含量增长表现为香蒲>鸢尾>菖蒲>芦苇,分别为 0.98、0.79、0.77、0.72 mg/g,磷含量增长表现为香蒲>鸢尾>芦苇>菖蒲,分别增长 0.51、0.44、0.43、0.36 mg/g。

生长时期,植物对污水中 NH₄⁺-N 和 TP 的去除率,邓志强等^[11]研究得出相似结论。原因可能是在植物快速生长时期植物生物量快速增加,新陈代谢旺盛对营养物质的需求量较大,在植物稳定时期植物生物量不再增加,新陈代谢减缓对营养物质的需求量降低,去除污水中 NH₄⁺-N 效率也降低。人工湿地污水处理系统净化效率在污水停留第 5 天减少,是由于当基质吸附污染物达到饱和后会向水体中解吸污染物质,造成二次污染。所以当污水停留时间过长时,对污水中污染物质的净化效率会有下降。另外有研究表明,人工湿地污水处理系统中污染物质的去除与微生物的活动关系密切^[12]。与植物快速生长时期相比,在植物稳定期环境温度有所下降,温度下降会对微生物的活动产生影响,降低微生物的活性,对于人工湿地污水处理系统的污染物去除率会产生影响。

植物对污水中污染物质的去除与植物的生物量有关^[13]。试验所选植物都是根系发达的植物,植物的地下

部生物量大于地上部生物量。试验结束后植物地上部地下部生物量都增加,地下部的生物量增加量大于地上部的生物量增加量。植物对污水中氮磷等污染物质的吸收主要是依靠植物的根系,植物的根系生物量越大,植物的吸收能力越强。植物地上部和地下部氮磷含量不同,地上部氮磷含量大于地下部氮磷含量,试验结束后植物地上部和地下部的氮磷含量均有增加,而且地上部的氮磷含量增加量大于地下部的氮磷含量增加量。说明虽然植物对氮磷等物质的吸收是依靠根系,但是植物体内的氮磷主要集中在植物的地上部,对植物地上部进行及时的收割,可以有效去除人工湿地污水处理系统中的污染物质。植物的地上部生物量越大,通过收割去除的污染物质越多。

该试验结果表明,植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率在污水停留第 4 天时达到最高,不同植物对污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率不同,最大去除率表现为香蒲 > 鸢尾 > 菖蒲 > 芦苇,去除率分别为 98.3%、98.2%、97.7%、96.8%。植物对污水中 TP 的去除率在污水停留第 4 天到达最高,不同植物对污水中 TP 的去除率不同,最大去除率表现为香蒲 > 菖蒲 > 鸢尾 > 芦苇,去除率分别为 96.7%、96.4%、95.9%、95.2%。在植物不同生长时期,植物对污水中污染物质的去除率不同,在植物快速生长期,植物的去除率大于植物稳定时期的去除率。植物对污染物质的净化效果与植物的生物量有关系,地下部生物量越大吸收的污染物质越多,地上部生物量越大通

过收割去除的污染物质越多。

参考文献

- [1] 耿兵,张燕荣,王妮珊,等. 不同水生植物净化污染源水的试验研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):548-553.
- [2] 秦伯强. 富营养化湖泊开敞水域水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报,2007,27(1):1-4.
- [3] 袁东海,高士祥,任全进,等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):77-80.
- [4] STOTTMEISTER U, WIENER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances,2003,22(1):93-117.
- [5] 张洪刚,洪剑明. 人工湿地中植物的作用[J]. 湿地科学,2006,4(2):146-154.
- [6] 孙光,马永胜,赵冉. 不同植物人工湿地对污水的净化效果[J]. 生态环境,2008,17(6):2192-2194.
- [7] 韩潇源,宋志文,李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合[J]. 湖泊科学,2008,20(6):741-747.
- [8] 常会庆,寇太记,乔鲜花,等. 几种植物去除污染水体中养分效果研究[J]. 水土保持通报,2009,29(5):118-122.
- [9] 王霞. 潜流人工湿地除氮机理的研究进展[J]. 电力环境保护,2007,23(2):46-48.
- [10] 董婵,崔玉波,余丹,等. 垂直潜流人工湿地污水处理特性[J]. 工业用水与废水,2006,37(5):20-24.
- [11] 邓志强,李旭辉,阎百兴,等. 富营养化水体中芦苇和菖蒲浮床氮净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(11):2258-2263.
- [12] JAMES F R. Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. Ecological Engineering,2000,14:33-47.
- [13] 陈永华,吴晓美,蒋丽鹃,等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学学报,2008,28(8):1549-1554.

Study on Purified Efficiency of Different Plants for Sewage

XIAO Guangmin¹, ZHANG Chengjun², LI Peng², ZHAO Tongke²

(1. Institute of Resources and Environment, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000; 2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry, Beijing 100097)

Abstract: This study compared the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and total phosphorus (TP) removal rate of calamus, *Iris tectorum*, reed and cattail in different periods, analyzed the changes of biomass, and nitrogen and phosphorus content of different plants, also discussed the factors affecting purification efficiency of plant. The results showed that the purification efficiency of plants in the fast growth period was higher than the purification efficiency of plant in the stable period. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal rate of the four plants followed that cattail > *Iris tectorum* > calamus > reed, and the removal rate was 98.3%, 98.2%, 97.7%, 96.8%, the TP removal rate of the four plants followed that cattail > calamus > *Iris tectorum* > reed, and the removal rate was 96.7%, 96.4%, 95.9%, 95.2%. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP removal rate were related to the biomass of the underground part of plant.

Keywords: wetland plant; artificial wetland; purification efficiency; biomass